doi:10.13866/j.azr.2019.02.23

我国荒漠植被生产力动态及其与水热因子的关系①

刘雪佳[1]， 董 璐[2]， 赵 杰[3]， 杜自强[2]， 张 红[1]

（1. 山西大学环境与资源学院，山西 太原 030006；2. 山西大学黄土高原研究所，山西 太原 030006；
3. 西北农林科技大学资源与环境学院，陕西 杨凌 712100）

摘 要： 为了探讨近30 a来我国干旱区荒漠植被的净初级生产力（*NPP*）及其与水热因子相关性随时间的变化，运用CASA（Carnegie-Ames-Stanford approach）模型估算我国荒漠植被1982—2015年生长季的*NPP*，并运用线性回归和GIS空间分析方法分析了*NPP*的时空变化特征，利用滑动相关系数分析了荒漠植被*NPP*与水热因子的关系。结果表明：① 单位面积*NPP*均值为42 $g \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$，*NPP*整体水平较低。空间上呈西北部、东部边缘较高，中部、南部和中东部较低的分布特征。② 荒漠植被*NPP*年均总量为5.783×10^{13} $g \cdot a^{-1}$。从荒漠植被*NPP*的年际变化来看，1982—2015年中国荒漠植被*NPP*总量以1.64×10^{12} $g \cdot (10a)^{-1}$的线性速率（$P=0.054$）上升，荒漠植被生长状况总体上不断改善，但总量趋势呈现阶段性变化，1982—1993年荒漠植被*NPP*总量呈极显著增长态势（1.25×10^{12} $g \cdot a^{-1}$，$P<0.01$）；1993—2006年*NPP*总量呈极显著降低态势（-6.42×10^{11} $g \cdot a^{-1}$，$P<0.01$）；2006—2015年*NPP*总量缓慢增长（1.70×10^{11} $g \cdot a^{-1}$，$P>0.05$）。从空间变化来看，47.65%的荒漠植被*NPP*呈增加态势，主要分布在阿拉善高原、天山北麓、塔里木盆地西部边缘、柴达木盆地的东南边缘、阿尔金山南麓和昆仑山脉。③ 从荒漠植被*NPP*与各气候因子之间的相关关系随时间的变化来看，*NPP*与气温的滑动相关系数随时间的变化保持为负相关，与降水、干燥度的滑动相关系数保持为正相关，与太阳总辐射的滑动相关系数随时间变化并未表现出显著的变化趋势。总体上，荒漠植被与水热因子的相关关系在研究时段均有进一步减弱的态势，即荒漠植被*NPP*对气候因子的变化愈来愈不敏感。

关键词： 净初级生产力；荒漠植被；气候因子；滑动相关；水热因子

净初级生产力（net primary productivity，*NPP*）是指绿色植物单位时间、单位面积所累积的有机干物质总量，是由光合作用所产生的有机质总量中扣除自养呼吸后的剩余部分[1]，不仅能反映自然植被的生产能力和陆地生态系统的质量，而且在测量陆地生态系统可持续发展能力方面也起着重要作用[2]。

荒漠植被是陆地生态系统的重要组成部分，主要分布在我国的西北干旱地区，是在极端干旱和恶劣的生境下发育的植被类型，具有发达的根系和独特的水分生理特征，抗旱能力较强，也能较快的响应外界环境的变化[3]。前人有关荒漠植被生长状况与气候因子关系的研究表明，我国西北干旱地区过去30年气候向暖湿化转型，植被主要呈改善趋势，降水量和蒸散发对植被生长影响较大[4]；吴晓全等[5]模拟的天山荒漠*NPP*为55.78 $g \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$，*NPP*总量波动趋于平缓，且荒漠植被*NPP*主要受降雨量的影响；叶静芸等[6]采用RVI线性模型估算我国乌兰布和沙漠东北缘的荒漠－绿洲过渡带内荒漠植被的单位面积地上生物量为90.73 $g \cdot m^{-2}$；李芳等[7]研究表明，黑河中游荒漠植被生产力对降水响应具有滞后期特征；Cui等[8]认为，阿拉善和河西走廊植被生长状况表现出退化趋势，内蒙古高原中部，西部大部分地区植被则呈现增长趋势；张凯等[9]认为，阿拉善地区东部荒漠植被有所改善，但中西部地区出现退化现象，降水量对荒漠植被的控制作用较强；也有研究认为，西北干旱区植被生长状况与降水、温度的相关性都不高[10]。以上的研究大多集中于西北干旱区某一区域的荒漠植被的生长状况，且进行植被与气候因子关系分析时关注的是整体的相关性，不能反映植被与气候因子相关关系的时间变化。因此，在西北地区暖湿化背景下，进行长时间序列，区域尺度上荒漠植被的*NPP*格局及其与气候因

① **收稿日期：** 2018－06－04； **修订日期：** 2018－10－08
基金项目： 国家自然科学基金（41161066，41401643）；山西省十二・五科技重大专项（201211010111）
作者简介： 刘雪佳（1994－），女，硕士研究生，主要从事植被与生态遥感、土地变化科学方面的研究．E-mail：chrxuejia@163.com
通讯作者： 杜自强．Email：duzq@sxu.edu.cn

子相关性随时间变化的研究十分必要,这将有助于全面认识植被—气候相互关系,揭示气候变暖给陆地生态系统带来的影响[3],为荒漠生态环境调节与生态恢复提供科学依据。

1 材料与研究方法

1.1 研究区概况

荒漠植被分布区(图1)是通过ArcGIS软件从我国1∶4 000 000《中国植被图》中提取出来的,主要分布于我国的西北干旱区,介于73°~115°E和35°~50°N,为年平均降水量小于200 mm且地理位置在贺兰山以西,总面积约2.5×10^6 km^2的广大区域。区域内山盆相间,西高东低,南高北低。常年受大陆性气候的影响,降雨稀少,蒸发强烈,是世界上最为干旱的地区之一。植被主要是以旱生、超旱生的灌木、半灌木及小乔木为建群种构成的稀疏植被,群落中植物种类稀少,区系成分单调;该区域又因地处中亚、西伯利亚、蒙古、青藏的交汇处,加上境内的自然地理条件在历史上又几经变迁,为各类植物区系成分的接触、混合和特化提供了有利条件,使其区系特征具有明显的特殊性[11]。

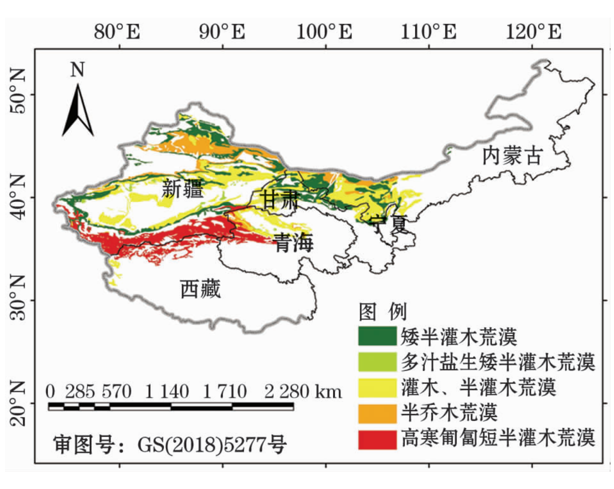


图1 荒漠植被分布区

Fig. 1 Distribution areas of desert vegetation

1.2 数据与方法

1.2.1 *数据来源及处理* 遥感数据是美国国家航天航空局全球监测与模型研究组(GIMMS)提供的NDVI 3g数据。时间序列为1982—2015年,空间分辨率约为8 km×8 km,时间分辨率为15 d。该数据集消除了太阳高度角、传感器灵敏度随时间变化等的影响,并结合交叉辐射定标的方法,增强了数据的精度。本文进一步采用最大值合成法消除了一部分云、大气的干扰,并减少月内物候循环的影响[12],得到每月的*NDVI*数据集。

荒漠植被包括温带矮半灌木荒漠、温带多汁盐生矮半灌木荒漠、温带灌木半灌木荒漠、温带半乔木荒漠和温带高寒匍匐矮半灌木荒漠。该数据来源于中国科学院植物研究所编制的1∶4 000 000《中国植被图》,通过ArcGIS软件提取。

本文所需的大气驱动数据包括太阳总辐射、月平均气温、月降水量、干燥度。数据来源于中国气象科学数据共享服务网提供的中国地面气候资料月值数据集。干燥度采用基于气温与降水数据计算的适于较大尺度研究广泛采用的de Martonne干燥度指数[13]。在此基础上,通过反距离权重法[14]对各个气象因子进行空间插值,生成与*NDVI*数据具有相同空间分辨率和投影方式的气象栅格数据[15]。

1.2.2 *研究方法*

(1) CASA模型

本文利用CASA(Carnegie-Ames-Stanford approach)模型来估算我国荒漠植被1982—2015年的生长季*NPP*[16]。该模型主要涉及2个变量,分别为植被吸收的光合有效辐射(*APAR*)和光能利用率(ε)。公式如下:

$$NPP(x,t)=APAR(x,t)\times\varepsilon(x,t) \quad (1)$$

式中:$APAR(x,t)$表示t月份像元x处吸收的光合有效辐射($MJ\cdot m^{-2}$);$\varepsilon(x,t)$表示t月份像元x处实际光能利用率($g\cdot MJ^{-1}$)。

光合有效辐射计算公式如下:

$$APAR(x,t)=SOL(x,t)\times FPAR(x,t)\times0.5 \quad (2)$$

式中:$SOL(x,t)$表示t月份像元x处的太阳总辐射量($MJ\cdot m^{-2}$);$FPAR(x,t)$表示植被层对入射光合有效辐射的吸收比例;0.5为植被能利用的太阳有效辐射(波长0.4~0.7 μm)占太阳总辐射的比例。

*FPAR*由*NDVI*和植被类型来表示,并不超过0.95。

$$FPAR=\min\left[\frac{SR(x,t)-SR_{min}}{SR_{max}-SR_{min}},0.95\right] \quad (3)$$

式中:$SR(x,t)$表示t月份像元x处的比值指数;SR_{min}取值为1.08,SR_{max}的大小与植被类型相关,取值范围在4.14~6.17。$SR(x,t)$由$NDVI(x,t)$求得:

$$SR(x,t)=\frac{1+NDVI(x,t)}{1-NDVI(x,t)} \quad (4)$$

光能利用率(ε)受温度和水分条件的影响，它指的是植被将吸收到的光合有效辐射(PAR)转化为有机碳的效率，计算公式如下：

$$\varepsilon(x,t)=T_{\varepsilon1}(x,t)\times T_{\varepsilon2}(x,t)\times W_{\varepsilon}(x,t)\times\varepsilon_{max} \quad (5)$$

式中：$T_{\varepsilon1}(x,t)$，$T_{\varepsilon2}(x,t)$表示温度对光能利用率的影响；W_{ε}表示水分对光能利用率的影响；ε_{max}表示理想状态下的最大光能利用率($g\cdot MJ^{-1}$)。

温胁迫因子的估算：$T_{\varepsilon1}(x,t)$和$T_{\varepsilon2}(x,t)$反映温度对光能利用率的影响。

$$T_{\varepsilon1}(x,t)=0.8+0.02\times T_{opt}(x)-0.0005\times[T_{opt}(x)]^2 \quad (6)$$

式中：$T_{opt}(x)$表示某一区域一年内$NDVI$值达到最高时的当月平均气温(℃)，当某月的平均气温小于或等于-10 ℃时，$T_{opt}(x)$取0。

$$T_{\varepsilon2}(x,t)=\frac{1.184}{\{1+\exp[0.2\times(T_{opt}(x)-10-T(x,t))]\}}\times\frac{1}{\{1+\exp[0.3\times(-T_{opt}(x)-10-T(x,t))]\}} \quad (7)$$

如果某月的平均气温$T(x,t)$高于最适气温$T_{opt}(x)=10$ ℃或低于$T_{opt}(x)=13$ ℃时，则这月的$T_{\varepsilon2}(x,t)$值是月平均气温$T(x,t)$为$T_{opt}(x)$时$T_{\varepsilon2}(x,t)$的1/2。

水分胁迫因子的估算：$W_{\varepsilon}(x,t)$反映的是水分对植物光能利用率的影响，随着环境中有效水分的增加，$W_{\varepsilon}(x,t)$逐渐增大，它的取值范围为0.5(在极端干旱条件下)到1(非常湿润条件下)。

$$W_{\varepsilon}(x,t)=0.5+0.5\times E(x,t)/E_p(x,t) \quad (8)$$

式中：$E(x,t)$表示区域实际蒸散量(mm)，可根据周广胜和张新时建立的区域实际蒸散模型求取[17]；$E_p(x,t)$表示区域潜在蒸散量，可根据Bouchet[18]提出的互补关系求取。

最大光能利用率的确定：根据误差最小原则，利用中国的NPP实测数据，模拟了各植被类型的最大光能利用率，该研究成果在估算中国植被NPP时得到广泛应用[19]。本文ε_{max}的取值也参照这一成果，其中荒漠ε_{max}为0.542 $g\cdot MJ^{-1}$。

(2) 滑动相关系数

滑动相关系数用来检验相关是否稳定。林学椿[20]认为，以10～20 a的滑动年数效果最好。因此，为了确定荒漠植被NPP与气候之间关系的时间变化，笔者选择17 a滑动步长，分别计算了生长季NPP和气温、降水、太阳总辐射、干燥度之间的相关系数，得到1982—1998年、1983—1999年，……，1999—2015年各时段的相关系数序列，据此来分析我国荒漠植被NPP与气候因子相关系数随时间变化的稳定性特征。$P<0.05$表示相关性显著；$P<0.01$表示相关性极显著。

(3) 线性回归分析

采用一元线性回归拟合荒漠植被NPP、气候因子和滑动相关系数的变化速率，通过t检验来检验变化速率(线性回归系数)的显著性[15]。

2 结果与分析

2.1 荒漠植被 *NPP* 的时空变化

1982—2015年中国荒漠植被单位面积年均NPP为42 $g\cdot m^{-2}$，呈西北部、东部边缘较高，中部、南部和中东部较低的空间分布特征(图2)。从单位面积年均NPP的分布状况来看，NPP低于50 $g\cdot m^{-2}$的区域占中国荒漠植被总面积的79.65%，分布于除天山、准噶尔盆地、祁连山、贺兰山及鄂尔多斯高原之外的大部分地区，介于50～100 $g\cdot m^{-2}$的占11.05%，集中分布在准格尔盆地、贺兰山、鄂尔多斯高原西北部。NPP介于0～100 $g\cdot m^{-2}$的荒漠植被面积占到了我国荒漠植被总面积的90.70%，表明我国荒漠植被生产力水平较低。

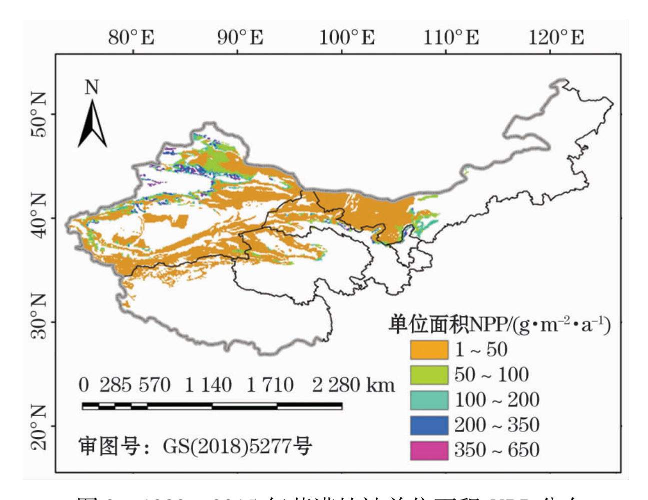


图2 1982—2015年荒漠植被单位面积 *NPP* 分布

Fig. 2 *NPP* Distribution of desert vegetation per unit area from 1982 to 2015

1982—2015年中国荒漠植被NPP年均总量为

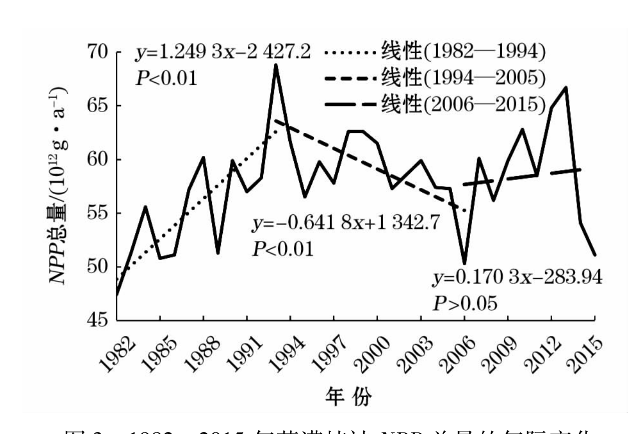


图 3　1982—2015 年荒漠植被 *NPP* 总量的年际变化

Fig. 3　Interannual change of total *NPP* of desert vegetation from 1982 to 2015

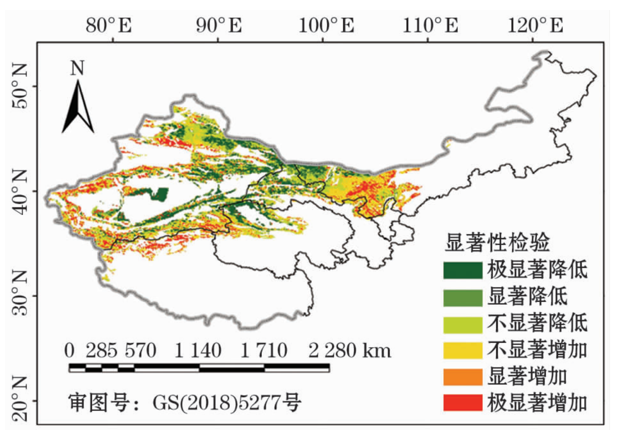


图 4　1982—2015 年荒漠植被 *NPP* 变化趋势显著性检验

Fig. 4　Significance test on the change trend of *NPP* of desert vegetation from 1982 to 2015

5.78×10^{13} g·a^{-1}，以 1.64×10^{12} g·(10a)$^{-1}$($P=0.054$)的线性速率增加。*NPP* 年总量呈现阶段性变化，1993 年之前荒漠植被的 *NPP* 总量以 1.25×10^{12} g·a^{-1} 的线性速率极显著增长($P<0.01$)；1993—2006 年 *NPP* 总量却以 6.42×10^{11} g·a^{-1} 的线性速率极显著降低($P<0.01$)；2006 年以后的 *NPP* 总量又开始缓慢增长($P>0.05$)(图 3)。逐像元来看，年际荒漠植被 *NPP* 以 0.09 g·m^{-2}·a^{-1}的速率增加，但变化速率表现出明显的空间异质性。*NPP* 呈增加态势的区域占荒漠植被总面积的 47.65%，其中 *NPP* 呈极显著增加($P<0.01$)、显著($P<0.05$)增加和不显著增加的面积分别占荒漠植被总面积的 13.38%、8.17% 和 26.10%，主要分布在阿拉善高原、天山北麓、塔里木盆地西部边缘、柴达木盆地的东南边缘、阿尔金山南麓和昆仑山脉。*NPP* 呈降低态势的区域占荒漠植被总面积的 52.35%，其中，*NPP* 极显著减少($P<0.01$)、显著减少($P<0.05$)和不显著减少的面积分别占荒漠植被总面积的 18.21%、9.12% 和 25.02%，分布在昆仑山和阿尔金山北麓、塔里木盆地中部、吐鲁番盆地、准噶尔盆地、北天山、河西走廊以北地区(图 4)。

2.2　荒漠植被 *NPP* 与水热因子相关关系的分析

影响植物生长的气候因子有很多，本文选择气温、降水量、太阳总辐射以及表征气候综合因子的干燥度指数来分析荒漠植被 *NPP* 与气候变化的滑动相关关系。1982—2015 年荒漠植被覆盖区气温、太阳总辐射分别以 0.491 ℃·(10a)$^{-1}$($P<0.01$)和 60.461 MJ·(10a)$^{-1}$($P<0.01$)的速率极显著增加，降水以 5.576 mm·(10a)$^{-1}$($P<0.05$)的速率显著增加(图 5)。干燥度分布在 0.63～1.04 之间且都小于 10，表明荒漠植被分布区为严重干旱地区，并且干燥度以 0.02·(10a)$^{-1}$($P>0.05$)速率波动增加，这与西北干旱区气候暖湿化结论相一致。本文以 17 a 为滑动步长分别计算了 1982—2015 年荒漠植被 *NPP* 与气温、降水量、太阳总辐射、干燥度之间的滑动相关系数，以此来分析荒漠植被 *NPP* 与各气候因子之间的关系。

荒漠植被 *NPP* 与气温的滑动相关系数(图 6)随时间出现了相关符号的改变。1982—1998 年和 1986—2002 年期间，两者呈正相关，但都没有通过 $P<0.05$ 的显著性检验；1987—2003 年之后，两者的相关性发生了转变，由正相关转变为负相关，且负相关随时间变化逐渐加强；1992—2008 年和 1993—2009 年的负相关达到了 $P=0.05$ 的显著性水平，呈显著负相关；1993—2009 年之后负相关关系逐渐减弱，并有进一步减弱的趋势。

荒漠植被 *NPP* 与降水量(图 6)在各个年段均呈正相关，但相关系数的趋势显现出阶段性的差异。1982—1998 年至 1987—2003 年相关系数持续降低，但没有出现相关符号的转变。1987—2003 年至 1996—2012 年 *NPP* 与降水量的正相关关系逐渐增强，并在 1996—2012 年达到了显著正相关。1996—2012 年之后正相关关系急剧减弱，有可能会进一步的减弱。

荒漠植被 *NPP* 与干燥度(图 6)在各个年段均呈正相关，1982—1998 年和 1983—1999 年正相关增强，1983—1999 年至 1987—2003 年 *NPP* 与干燥度的正相关逐渐减弱。1987—2003 年之后相关系数的变化趋势与 *NPP* 和降水相关系数的变化趋势一致。1987—2003 年至 1996—2012 年的相关系数

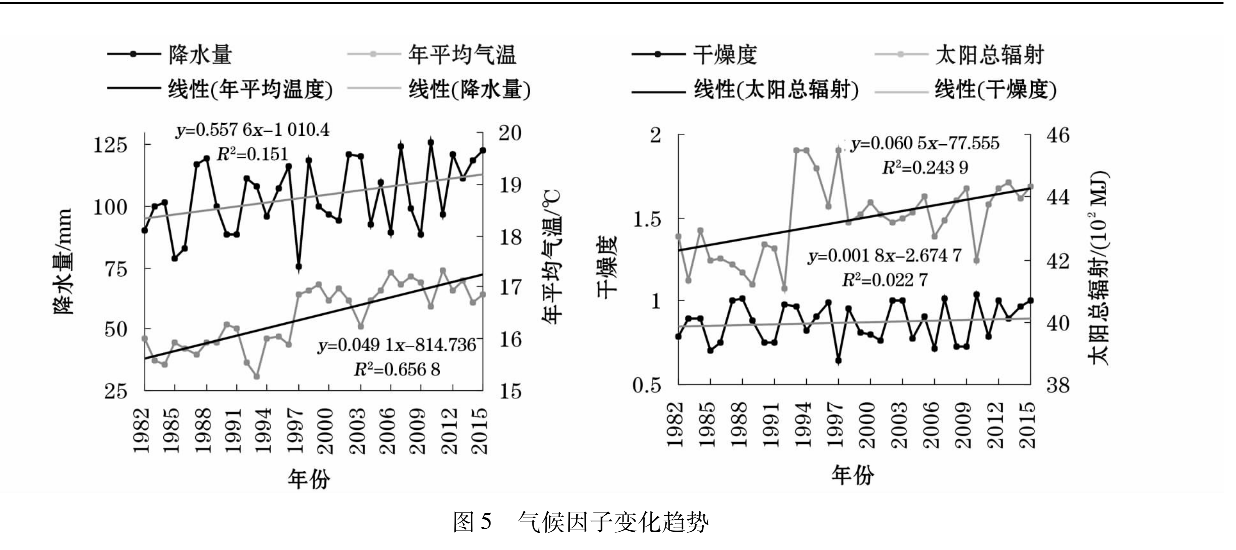


图5　气候因子变化趋势

Fig. 5　Change trends of climatic factors

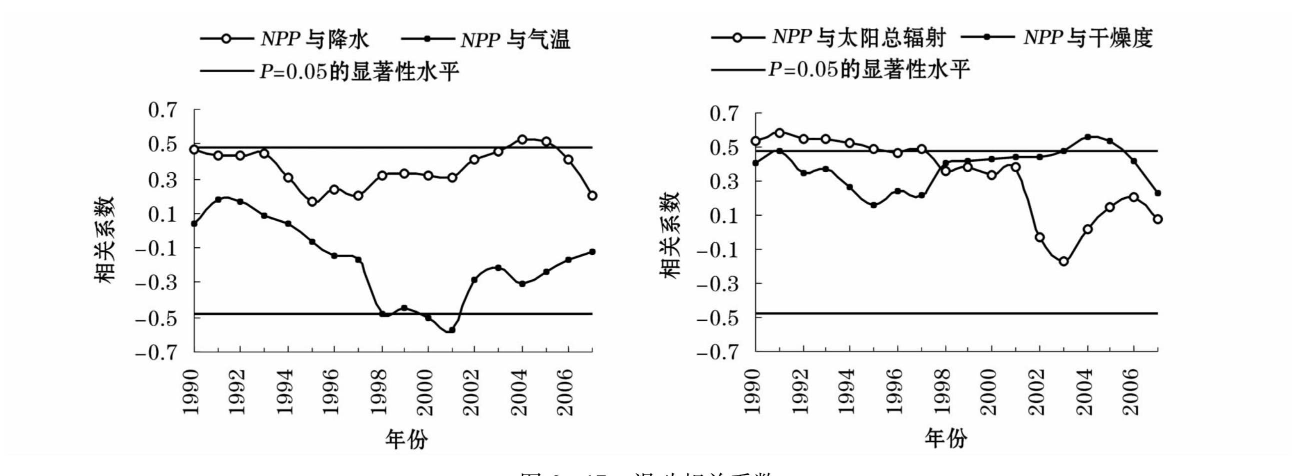


图6　17 a 滑动相关系数

Fig. 6　Seventeen-year sliding correlation coefficients

普遍比 *NPP* 与降水的相关系数高,且相关性逐渐增强,到1996—2012年达到了显著正相关。1996—2012年之后正相关关系减弱,并可能会进一步的减弱。

荒漠植被 *NPP* 与太阳总辐射的滑动相关系数(图6)随时间出现了相关符号的改变。1982—1998年至1983—1999年期间,两者正相关关系增强,都通过了 $P<0.05$ 的显著性检验。1983—1999年至1993—2009年,两者的正相关关系逐渐减弱,但相关系数在1984—2000年、1987—2003年和1989—2005年达到了 $P=0.05$ 显著正相关。1993—2009年之后,两者的相关系数由正相关转变为负相关,直到1995—2011年之后相关系数转变为正相关并逐渐增强,但到1998—2014年之后两者的正相关关系逐渐减弱,并有进一步减弱的趋势。

总的来说,荒漠植被 *NPP* 与气温的滑动相关系数随时间的变化主要保持为负相关,荒漠植被 *NPP* 与降水、干燥度的滑动相关系数随时间的变化保持为正相关,而荒漠植被 *NPP* 与太阳辐射的相关系数随时间未表现出明显的相关性,但四者的相关关系均有进一步减弱的趋势,即证明荒漠植被 *NPP* 对气候因子的变化愈来愈不敏感。

3　讨论与结论

(1)1982—2015年,中国荒漠植被单位面积 *NPP* 均值为42 $g\cdot m^{-2}\cdot a^{-1}$。本文将2000—2015年的估算结果与MODIS同期的500 m分辨率 *NPP* 产品(MOD17A3H)进行了对比,发现MOD17A3H在大部分荒漠植被覆盖较少的地区出现缺值现象,如塔克拉玛干沙漠、昆仑山脉、准噶尔盆地、柴达木盆地周边及阿拉善高原的大部分地区[21]。在与本文研究范围重合的3 220个像元中,两者的相关系

数为 0.57，达到了极显著相关，说明 MODIS *NPP* 产品与笔者估算的 *NPP* 结果非常吻合。Wang 等[2]估算的我国干旱半干旱地区 2000—2010 年的年均 *NPP* 为 159.31 $g \cdot m^{-2}$，且在这 10 a 内 *NPP* 呈上升趋势，但由于研究范围包括水热条件较好的内蒙古东部地区，所以估算的 *NPP* 年均值较高。焦伟等[21]基于 2000—2014 年的 MODIS NDVI 数据模拟的我国西北干旱区荒漠植被的年均 *NPP* 为 51.1 $g \cdot m^{-2}$，Pan 等[22]模拟的我国荒漠植被的年均 *NPP* 为 56.3 $g \cdot m^{-2}$，本文研究结果与之相近，可见，本研究结果能反映我国荒漠植被的 *NPP*。

（2）过去的 34 a 来我国荒漠植被 *NPP* 年平均总量为 5.782×10^{13} g，*NPP* 总量呈现出增长的态势，这与北半球陆地植被 *NPP* 在过去几十年有所增加[23]的趋势相一致，表明我国荒漠植被在固碳方面发挥着越来越大的作用。整个时期荒漠植被 *NPP* 年总量呈现阶段性变化，1982—1993 年荒漠植被 *NPP* 总量呈极显著增长态势（1.25×10^{12} $g \cdot a^{-1}$，$P < 0.01$）；1993—2006 年 *NPP* 总量呈极显著降低态势（-6.4×10^{11} $g \cdot a^{-1}$，$P < 0.01$）；2006—2015 年 *NPP* 总量缓慢增长（1.7×10^{11} $g \cdot a^{-1}$，$P > 0.05$）。通过分析这 3 个阶段的气温、降水量、干燥度和太阳总辐射的变化趋势，发现 *NPP* 的变化趋势与同期气温呈负相关，与同期的降水、干燥度和太阳辐射呈正相关。有研究表明，我国在 1988 年、2000 年、2003 年、2010 年也都发生过不同程度的干旱，当时我国的 *NPP* 明显减少[23]。然而，我们并没有观察到在这几个年份里荒漠植被 *NPP* 发生明显下降，这表明干旱可能并没有对荒漠植被的生产力造成显著的影响。

（3）我国荒漠植被 *NPP* 整体水平较低，介于 0～100 $g \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$的面积占到了 90.7%，这主要是由于我国西北地区气候极为干燥，植被的生产力较低[24]。单位面积 *NPP* 大于 100 $g \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$的地区主要分布在天山和祁连山地区，这主要受局部地形和海拔的影响，有较多的降水[25]，且降水与 *NPP* 保持为正相关，降水的增加能促进荒漠植物的生长。而 *NPP* 空间变化的异质性则与气温、降水量的地区分布不均和空间年际变化速率不同有关。

（4）笔者研究结果显示，荒漠植被 *NPP* 与气温、降水、太阳总辐射、干燥度之间的相关系数具有时间变异性，这种变化表明荒漠植被活动对气候变化的响应存在时间差异。但荒漠植被 *NPP* 与气温的滑动相关系数保持为负相关，与降水、干燥度的滑动相关系数保持为正相关，与太阳辐射的相关性不明显。也就是说，降水量的多少是影响 *NPP* 变化最主要的气候因子，气温对 *NPP* 变化的影响较小[26]。在干旱地区，气温上升不仅影响植被的光合作用和呼吸作用，还加强了蒸散并会降低土壤湿度，限制植物的生长，从而会导致 *NPP* 的下降[2]。与气温上升相比，降水量的增加会使土壤水分增加，更有利于荒漠植被的生长。而总体上，荒漠植被与水热因子的相关关系在研究时段均有进一步减弱的态势，即荒漠植被 *NPP* 对气候因子的变化愈来愈不敏感。

本文只探讨了 4 种气候因子与荒漠植被的相关关系，有一定的局限性。今后需加强荒漠植被 *NPP* 与不同深度土壤湿度、土壤特征等因素之间关系的分析，因为土壤水分是干旱区植被生存及生长发育的关键限制因子[27]。另外，人类活动会导致荒漠植被覆盖地区的土地利用方式发生变化，也对植被 *NPP* 产生影响。本文西北地区荒漠植被分布区是从 1:4 000 000 的《中国植被图》中提取出的，相对于 34 a 的研究时段来说过于粗糙，今后应采用多时相的遥感图像提取植被分布图，提高研究的准确度。因此，结合 *NPP* 的遥感估算，充分利用多时相、不同来源的遥感资料进行植被的动态监测是今后要做的工作。

参考文献（References）：

〔1〕 Field C B，Behrenfeld M J，Randerson J T，et al. Primary production of the biosphere：Integrating terrestrial and oceanic components〔J〕. Science，1998，281（5 374）：237－240.

〔2〕 Wang H，Liu G H，Li Z S，et al. Impacts of climate change on net primary productivity in arid and semiarid regions of China〔J〕. Chinese Geographical Science，2016，26（1）：35－47.

〔3〕 杨雪梅. 气候变暖背景下河西地区荒漠植被变化研究（1982—2013）〔D〕. 兰州：兰州大学，2015.〔Yang Xuemei. Spatial-temporal Variation of Desert Vegetation and Its Response to Climate Change in Hexi Area during 1982－2013〔D〕. Lanzhou：Lanzhou University，2015.〕

〔4〕 Zhao X，Tan K，Zhao S，et al. Changing climate affects vegetation growth in the arid region of the Northwestern China〔J〕. Journal of Arid Environments，2011，75（10）：946－952.

〔5〕 吴晓全，王让会，李成，等. 天山植被 *NPP* 时空特征及其对气候要素的响应〔J〕. 生态环境学报，2016，25（11）：1 848－1 855.〔Wu Xiaoquan，Wang Ranghui，Li Cheng，et al. Spatial-temporal characteristics of *NPP* and its response to climatic factors in Tianshan Mountains Region〔J〕. Ecology and Environmental

Sciences,2016,25(11):1 848 – 1 855.]

〔6〕 叶静芸,吴波,刘明虎,等.乌兰布和沙漠东北缘荒漠 – 绿洲过渡带植被地上生物量估算〔J〕.生态学报,2018,38(4):1 216 – 1 225.〔Ye Jingyun,Wu Bo,Liu Minghu,et al. Estimation of aboveground biomass of vegetation in the desert-oasis ecotone on the northeastern edge of the Ulan Buh Desert〔J〕. Acta Ecologica Sinica,2018,38(4):1 216 – 1 225.〕

〔7〕 李芳,赵文智.黑河中游荒漠生态系统归一化植被指数对降水的响应〔J〕.植物生态学报,2016,40(12):1 245 – 1 256.〔Li Fang,Zhao Wenzhi. Changes in normalized difference vegetation index of deserts and dunes with precipitation in the middle Heihe River Basin〔J〕. Chinese Journal of Plant Ecology,2016,40(12):1 245 – 1 256.〕

〔8〕 Cui Y P,Liu J Y,Hu Y F,et al. An analysis of temporal evolution of NDVI in various vegetation-climate regions in Inner Mongolia, China〔J〕. Procedia Environmental Sciences,2012(13):1 989 – 1 996.

〔9〕 张凯,司建华,王润元,等.气候变化对阿拉善荒漠植被的影响研究〔J〕.中国沙漠,2008,28(5):879 – 885.〔Zhang Kai,Si Jianhua,Wang Runyuan,et al. Impact of climate change on desert vegetation in Alxa region〔J〕. Journal of Desert Research,2008,28(5):879 – 885.〕

〔10〕 高志强,刘纪远.基于遥感和 GIS 的中国植被指数变化的驱动因子分析及模型研究〔J〕.气候与环境研究,2000,5(2):155 – 164.〔Gao Zhiqiang,Liu Jiyuan. The study on driving factors and models of NDVI change based on remote sensing and GIS in China〔J〕. Climatic and Environmental Research,2000,5(2):155 – 164.〕

〔11〕 王健铭,王文娟,李景文,等.中国西北荒漠区植物物种丰富度分布格局及其环境解释〔J〕.生物多样性,2017,25(11):1 192 – 1 201.〔Wang Jianming,Wang Wenjuan,Li Jingwen,et al. Biogeographic patterns and environmental interpretation of plant species richness in desert regions of northwest China〔J〕. Biodiversity Science,2017,25(11):1 192 – 1 201.〕

〔12〕 赵杰,杜自强,张红,等.中国季节性昼夜增温的不对称性及其对植被活动的影响〔J〕.生态学报,2018,38(11):3 909 – 3 919.〔Zhao jie,Du Ziqiang,Zhang Hong,et al. Asymmetric seasonal variability in day- and night-time warming and their effects on vegetation activity in China〔J〕. Acta Ecologica Sinica,2018,38(11):3 909 – 3 919.〕

〔13〕 孟猛,倪健,张治国.地理生态学的干燥度指数及其应用评述〔J〕.植物生态学报,2004,28(6):853 – 861.〔Meng Meng,Ni Jian,Zhang Zhiguo. Aridity index and its applications in Geo-Ecological study〔J〕. Acta Phytoecologica Sinica,2004,28(6):853 – 861.〕

〔14〕 Dong L,Zhang M,Wang S,et al. The freezing level height in the Qilian Mountains, Northeast Tibetan Plateau based on reanalysis data and observations,1979 – 2012〔J〕. Quaternary International,2015(380 – 381):60 – 67.

〔15〕 赵杰,杜自强,武志涛,等.中国温带昼夜增温的季节性变化及其对植被动态的影响〔J〕.地理学报,2018,73(3):395 – 404.〔Zhao Jie,Du Ziqiang,Wu Zhitao,et al. Seasonal variations of day- and nighttime warming and their effects on vegetation dynamics in China's temperate zone〔J〕. Acta Geographica Sinica,2018,73(3):395 – 404.〕

〔16〕 李枫,蒙吉军.黑河中游净初级生产力的人类占用时空分异〔J〕.干旱区研究,2018,35(3):743 – 752.〔Li Feng,Meng Jijun. Temporal and spatial variation of human appropriation of net primary productivity in the middle reaches of the Heihe River Basin〔J〕. Arid Zone Research,2018,35(3):743 – 752.〕

〔17〕 周广胜,张新时.自然植被净第一性生产力模型初探〔J〕.植物生态学报,1995,19(3):193 – 200.〔Zhou Guangsheng,Zhang Xinshi. A natural vegetation NPP model〔J〕. Chinese Journal of Plant Ecology,1995,19(3):193 – 200.〕

〔18〕 Bouchet R. Evapotranspiration réelle et potentielle, signification climatique〔J〕. IAHS Publication,1963,62:134 – 142.

〔19〕 朱文泉.中国陆地生态系统植被净初级生产力遥感估算及其与气候变化关系的研究〔D〕.北京:北京师范大学,2005.〔Zhu Wenquan. Estimation of Net Primary Productivity of Chinese Terrestrial Vegetation Based on Remote Sensing and Its Relationship with Global Climate Change〔D〕. Beijing:Beijing Normal University,2005.〕

〔20〕 林学椿.统计天气预报中相关系数的不稳定性问题〔J〕.大气科学,1978,2(1):55 – 63.〔Lin Xuechun. Instability of correlation coefficient in statistical weather forecast〔J〕. Scientia Atmospherica Sinica,1978,2(1):55 – 63.〕

〔21〕 焦伟,陈亚宁,李稚.西北干旱区植被净初级生产力的遥感估算及时空差异原因〔J〕.生态学杂志,2017,36(1):181 – 189.〔Jiao Wei,Chen Yaning,Li Zhi. Remote sensing estimation and the reasons for temporal-spatial differences of vegetation net primary productivity in arid region of Northwest China〔J〕. Chinese Journal of Ecology,2017,36(1):181 – 189.〕

〔22〕 Pan S F,Tian H Q,Dangal S R S,et al. Impacts of climate variability and extremes on global net primary production in the first decade of the 21st century〔J〕. Journal of Geographical Science,2015,25(9):1 027 – 1 044.

〔23〕 Liang W,Yang Y T,Fan D M,et al. Analysis of spatial and temporal patterns of net primary production and their climate controls in China from 1982 to 2010〔J〕. Agricultural and Forest Meteorology,2015,204:22 – 36.

〔24〕 张杰,潘晓玲,高志强,等.干旱生态系统净初级生产力估算及变化探测〔J〕.地理学报,2006,61(1):15 – 25.〔Zhang Jie,Pan Xiaoling,Gao Zhiqiang,et al. Satellite estimates and change detection of net primary productivity of oasis-desert based on ecosystem process with remotely sensed forcing in arid western China〔J〕. Acta Geographica Sinica,2006,61(1):15 – 25.〕

〔25〕 姚俊强,杨青,陈亚宁,等.西北干旱区气候变化及其对生态环境的影响〔J〕.生态学杂志,2013.32(5):1 283 – 1 291.〔Yao Junqiang,Yang Qing,Chen Yaning,et al. Climate change in arid areas of Northwest China in past 50 years and its effects on the lo-

cal ecological environment〔J〕. Chinese Journal of Ecology, 2013, 32(5): 1 283 - 1 291.〕

〔26〕李燕丽,潘贤章,王昌昆,等. 2000—2011 年广西植被净初级生产力时空分布特征及其驱动因素〔J〕. 生态学报, 2014, 34(18): 5 220 - 5 228.〔Li Yanli, Pan Xianzhang, Wang Changkun, et al. Changes of vegetation net primary productivity and its driving factors from 2000 to 2011 in Guangxi, China〔J〕. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(18): 5 220 - 5 228.〕

〔27〕王家强,韩路,柳维扬,等. 塔里木河中游荒漠绿洲过渡带土壤水分与植被空间格局变化关系研究〔J〕. 西北林学院学报, 2018, 33(1): 1 - 10.〔Wang Jiaqiang, Han Lu, Liu Weiyang, et al. Variable relationship of soil moisture and spatial pattern along desert oasis transition zone in the Tarim River middle reaches basin〔J〕. Journal of Northwest Forestry University, 2018, 33(1): 1 - 10.〕

Dynamic State of Desert Vegetation Productivity and Its Relationship with Water-Heat Factors in China

LIU Xue-jia[1], DONG Lu[2], ZHAO Jie[3], DU Zi-qiang[2], ZHANG Hong[1]

(1. *College of Environment and Resources*, *Shanxi University*, *Taiyuan* 030006, *Shanxi*, *China*;
2. *Institute of Loess Plateau Research*, *Shanxi University*, *Taiyuan* 030006, *Shanxi*, *China*;
3. *College of Natural Resources and Environment*, *Northwest A&F University*, *Yangling* 712100, *Shaanxi*, *China*)

Abstract: In this paper, the Carnegie-Ames-Stanford Approach (CASA) model was used to estimate the *NPP* of desert vegetation in its growing season from 1982 to 2015, and the linear regression and GIS spatial analysis methods were applied to analyze the spatiotemporal variation of *NPP*. The purposes of the study were to explore the net primary productivity of desert vegetation and its correlation with water-heat factors in China's arid regions in recent three decades. The sliding correlation coefficient was used to analyze the relationship between *NPP* and water-heat factors. The results showed that: ① The average *NPP* per unit area was 42 $g \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$, and the overall level of *NPP* was low. Spatially, it was higher in the northwestern and eastern margins but lower in the central, southern and mid-eastern regions; ② The average annual *NPP* of desert vegetation was 5.78×10^{13} $g \cdot a^{-1}$. For the interannual variation, the linear change rate of the total *NPP* of desert vegetation was 1.64×10^{12} $g \cdot (10a)^{-1}$ ($P = 0.054$) in China from 1982 to 2015, desert vegetation was generally improved, but the total change trend was staged. The total amount of *NPP* showed an extremely significant growth trend (1.25×10^{12} $g \cdot a^{-1}$, $P < 0.01$) during the period of 1982 - 1993, it was significantly decreased from 1993 to 2006 (-6.42×10^{11} $g \cdot a^{-1}$, $P < 0.01$), and increased slowly during the period of 2006 - 2015 (1.70×10^{11} $g \cdot a^{-1}$, $P > 0.05$). From the perspective of spatial change, 47.65% *NPP* of desert vegetation was in an increase trend, which was mainly distributed in the Alashan Plateau, north piedmont of the Tianshan Mountains, western marginal zone of the Tarim Basin, southeastern marginal zone of the Qaidam Basin, south piedmont of the Altun Mountains and Kunlun Mountains; ③ From the perspective of the change of correlation between desert vegetation *NPP* and climatic factors with the time, the sliding correlation coefficient between *NPP* and temperature was negatively correlated with the time, but positively correlated between *NPP* and precipitation and dryness. There was no significant variation of sliding correlation coefficient between *NPP* and total solar radiation with the time. In general, the correlation between desert vegetation and water-heat factors was further weakened during the study period, that is, the desert vegetation *NPP* was increasingly insensitive to the change of climatic factors.

Key words: net primary productivity; desert vegetation; climatic factor; sliding correlation; hydrothermic factor